УДК 621.436

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ – ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И СГОРАНИЯ В ДИЗЕЛЕ

В.В. Гаврилов

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
E-mail: gavrilov@VG5647.spb.edu

Описан оригинальный метод экспериментального исследования, приведены экспериментальные данные о распределении масс и скоростей движения жидкого топлива и спутного газа по длине развивающейся струи дизельной форсунки. Эти данные использованы для уточнения математической модели комплекса процессов в цилиндре дизеля. Представлены результаты расчетов по уточненной модели.

Улучшение технико-экономических и экологических показателей дизелей – актуальная проблема развития энергетики. Эти показатели существенно зависят от совершенства смесеобразования и сгорания в дизеле, которое определяется согласованностью большого числа конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры, камеры сгорания и заряда цилиндра. На практике согласование параметров выполняется во время доводки рабочего процесса дизеля на стенде завода-изготовителя. При этом многие решения принимаются по интуиции, методом проб и ошибок, без достаточно ясного понимания сущности происходящих в дизеле процессов. Работа по доводке чрезвычайно продолжительна и трудоемка. Не всегда достигается наилучший ее результат. Повысить качество и ускорить доводку возможно путем применения математической модели комплекса внутрицилиндровых процессов. Для того, чтобы модель адекватно реагировала на изменения упомянутых параметров, она должна быть основана на достоверных знаниях о явлении и сущности протекающих в цилиндре процессов. Между тем, в последние годы в связи с бурным развитием вычислительной техники наблюдается чрезмерное увлечение специалистов расчетными методами, не подкрепленными необходимыми экспериментальными данными. Ослабление внимания к эксперименту приводит к тому, что создаваемые весьма сложные математические модели, требующие больших затрат труда при их использовании и значительных вычислительных ресурсов, не дают достаточно точных количественных результатов расчета и не обладают необходимой степенью универсальности.

С учетом сказанного проводимая нами многолетняя работа направлена на получение необходимых экспериментальных данных об элементарных процессах в цилиндре дизеля, а также о промежуточных и завершающих стадиях комплекса процессов.

В рассматриваемом контексте принципиально важными, имеющими ключевое значение, являются экспериментальные данные о распределении масс и скоростей движения капельного топлива и спутного газа в топливной струе в различные мо-

менты времени ее развития. Именно эти данные необходимы для адекватного моделирования и совершенствования процессов испарения, воспламенения и горения топлива в дизеле. Вместе с тем, существующие представления о распределении указанных величин весьма различаются. Ряд специалистов до сих пор являются сторонниками широко распространенной в 70–80-е годы XX века зонной модели, в соответствии с которой в период развития струи основная масса топлива накапливается в зоне ее фронта [1]. Другие авторы указанного накапливания не допускают [2]. Ввиду отсутствия необходимых экспериментальных данных, а также для упрощения сложных систем уравнений авторы зачастую вынуждены принимать допущение о равенстве скоростей капельного топлива и спутного газа в осредненном движении струи [2]. Такое допущение не всегда оправдано.

В целях разрешения отмеченных противоречий и уточнения физической картины обсуждаемых процессов нами создан и используется комплекс различных специальных методов и средств экспериментальных исследований. Эксперименты, в которых реализован основной метод, заключаются в определении расходных характеристик впрыскивания топлива и кривых изменения секундного количества движения струи дизельной форсунки, получаемых на различных расстояниях от сопла.

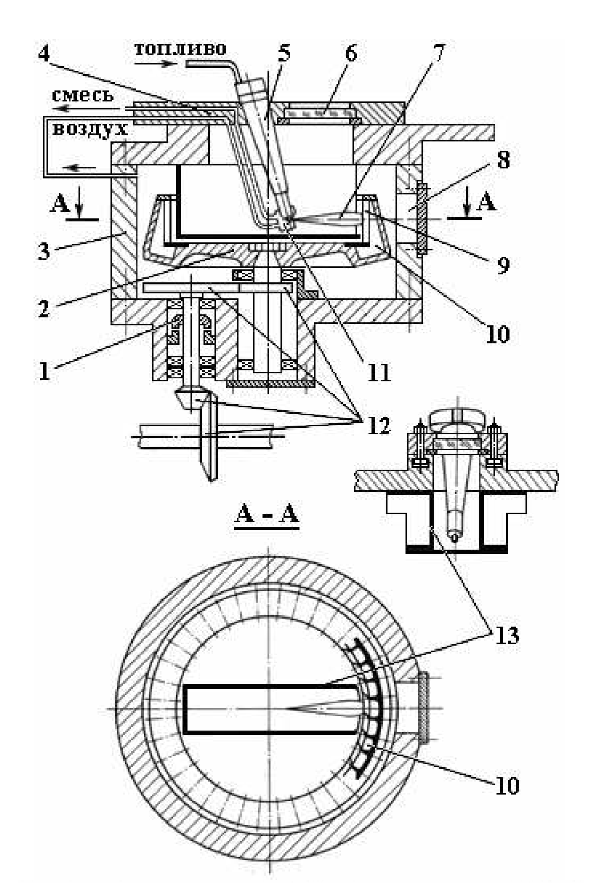


Рис. 1. Схема ячеистого стробоскопа

Основной элемент экспериментальной установки – камера высокого давления, показанная на рис. 1. В ходе экспериментов камеру оборудуют либо специальным ячеистым барабаном – 2, либо специальным датчиком силы, устанавливаемым в люке – 8 корпуса – 3 камеры. В первом случае установка аналогична известному ячеистому стробоскопу для определения расходной характеристики впрыскивания топлива: укрепленный на вертикальном вале ячеистый барабан посредством системы зубчатых колес – 12 мультипликатора кинематически жестко связан с валом топливного насоса высокого давления. Однако разработанный стробоскоп имеет ряд существенных отличий. В частности, устройство для крепления форсунки – 5 выполнено в виде подвижной каретки – 4, исследуемая струя – 7 развивается в ограждающем канале, образованном стенками – 13, а в полости стробоскопа может быть создано необходимое противодавление. В целях герметизации полости на одном из валов мультипликатора установлено торцевое графитовое уплотнение – 1. Скорость движения специально спрофилированной рассекающей решетки – 9 значительно выше, чем в известном устройстве. В установке может быть использована штатная дизельная форсунка с многодырчатым соплом. В этом случае исследуется струя, распространяющаяся только из одного соплового отверстия. От остальных отверстий топливо отводится и удаляется из стробоскопа при помощи топливоотводящего колпачка – 11, надеваемого на сопло форсунки. В корпусе имеется окно – 6 для высокоскоростной киносъемки процессов в камере.

При работе установки вращающаяся рассекающая решетка осуществляет стробоскопическое разделение струи на порции. Топливо от некоторого заранее заданного числа впрыскиваний скапливается в ячейках – 10 барабана. Определив распределение его массы по ячейкам, строят кривую изменения расхода топлива через i-ое поперечное сечение струи для выбранного расстояния от сопла. Устанавливая форсунку на различных расстояниях l от рассекающей решетки, получают серию указанных кривых расхода. Пример такой серии приведен на рис. 2.

Масса топлива (кг), находящегося в момент времени τ на некотором отрезке длины струи между сечениями i и i+1, может быть подсчитана по формуле

$$m_{i,i+1} = \int_0^{\tau} (q_{f_i} - q_{f_{i+1}})\, d\tau,$$

где q_f – расход топлива через поперечное сечение струи, кг/с. Среднее значение "погонной" массы топлива (кг/м) на рассматриваемом участке струи длиной $l_{i,i+1}$ выражается как :

$$C_{l\ i,i+1} = m_{i,i+1} / l_{i,i+1} .$$

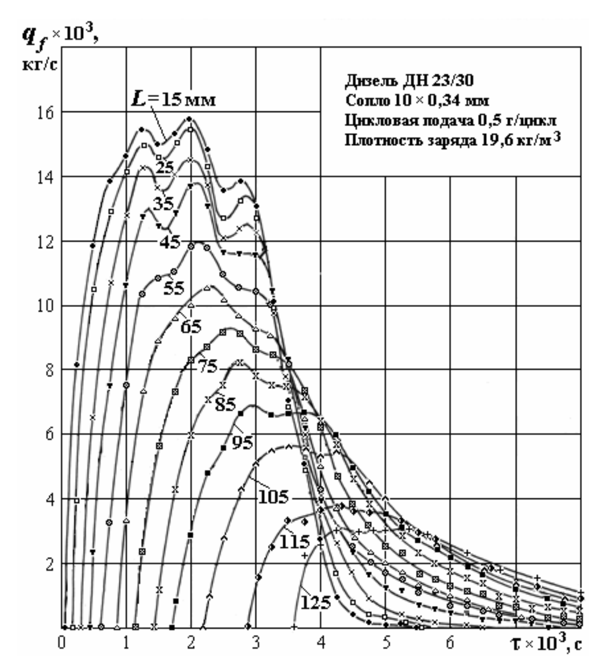


Рис. 2. *Характеристики расхода топлива через поперечные сечения струи на различных расстояниях от сопла форсунки*

По значениям $C_{li,i+1}$, полученным для всех участков, строят кривую изменения C_l по длине струи для заданного момента времени τ. На рис. 3 такие кривые показаны для восьми моментов времени, включая момент окончания впрыскивания топлива.

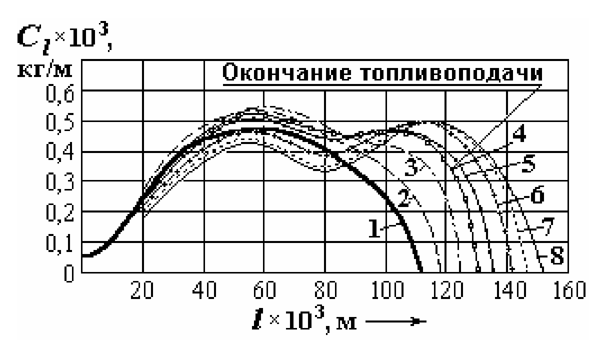


Рис. 3. *Распределение массы топлива по длине струи в заключительной стадии и после окончания топливоподачи: 1) τ = 2,6 мс; 2) 3,1; 3) 3,6; 4) 4,1; 5) 4,6; 6) 5,1; 7) 5,6; 8) 6,1*

Полученный уникальный результат характеризует распределение массы топлива по длине импульсной струи и свидетельствует об отсутствии предполагаемого некоторыми авторами накапливания топлива во фронте струи в период ее развития. Заметим, что аналогичный характер распределения топлива зарегистрирован нами методом иконики (оптико-электронная цифровая обработка и анализ распределения плотности кинонегатива с изображением струи) [3].

Скорость движения топлива (м/с), осредненная по расходу через поперечное сечение струи на любом расстоянии от сопла в любой момент времени, определяется как

$$w_f = q_f / C_l.$$

Для получения характеристик скорости движения спутного газа (воздуха) в струе w_a (м/с) вместо ячеистого барабана в корпусе камеры высокого давления устанавливают упомянутый датчик силы. Специально сконструированный нами высокочувствительный датчик для регистрации секундного количества движения струи в ее поперечном сечении P_s (H) содержит силовоспринимающую пластину, опертую на три кольцевые упругие элемента с наклеенными на них тензорезисторами. Пример серии кривых изменения P_s во времени для некоторых расстояний от сопла представлен на рис. 4. По этим кривым определяют изменение P_s по длине струи для различных моментов времени, которое для $\tau = 1 \cdot 10^{-3}$ с показано на рис. 5.



Рис. 4. *Изменение секундного количества движения струи на различных расстояниях от сопла форсунки*

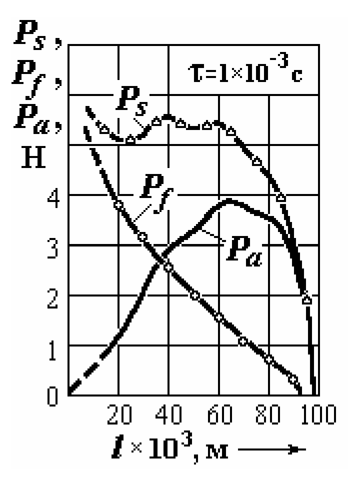


Рис. 5. *Изменение секундного количества движения и его составляющих по длине струи*

Секундное количество движения струи P_s представляет собой сумму его составляющих – секундных количеств движения топлива P_f и спутного воздуха P_a.

По описанным выше результатам измерений при помощи ячеистого стробоскопа вычисляется составляющая P_f:

$$P_f = q_f \alpha_f w_f, \quad (1)$$

где α_f – коэффициент неравномерности количества движения топлива.

Составляющая P_a вычисляется как разность

$$P_a = P_s - P_f. \quad (2)$$

Определенное с использованием выражений (1) и (2) распределение секундных количеств движения топлива и воздуха по длине струи для рассматриваемого момента времени дано на рис. 5.

Выполненные операции позволяют получить распределения средних по расходу скоростей движения топлива и воздуха по длине струи, которые показаны на рис. 6. При этом находится из выражения (1), а для вычисления используется первое уравнение Эйлера, в соответствии с которым

$$P_a = \rho_a F_s \alpha_a w_a^2, \qquad (3)$$

где ρ_a – плотность воздуха в струе, кг/м³. В первом приближении ρ_a можно принять равной плотности воздуха в окружающем струю пространстве; F_s – площадь поперечного сечения струи, м², которая оценивается по результатам высокоскоростной киносъемки процесса развития струи; α_a – коэффициент неравномерности количества движения воздуха.

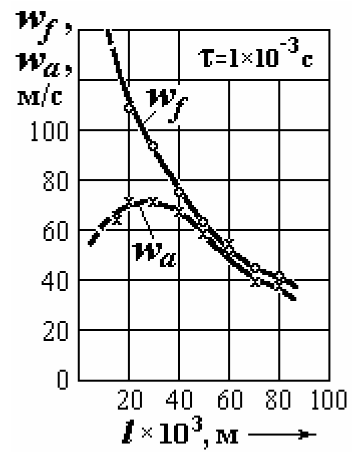


Рис. 6. *Изменение скорости движения топлива и воздуха по длине струи*

Получены выражения коэффициентов α_f и α_a, участвующих в формулах (1) и (3) для связи средних по расходу скоростей топлива и воздуха с количеством их движения:

$$\alpha_a = \frac{\int_0^1 \left(\frac{w}{w_m}\right)^2 \xi d\xi}{2\left(\int_0^1 \frac{w}{w_m}\xi d\xi\right)^2}; \qquad (4)$$

$$\alpha_f = \frac{\left[\int_0^1 \left(\frac{w}{w_m}\right)^2 \frac{\chi}{\chi_m}\xi d\xi\right]\int_0^1 \frac{\chi}{\chi_m}\xi d\xi}{\left(\int_0^1 \frac{w}{w_m}\frac{\chi}{\chi_m}\xi d\xi\right)^2}. \qquad (5)$$

В формулах (4) и (5) w_m – скорость на оси струи, м/с; $\xi = y/r$ – безразмерная координата (y – текущий радиус точки; r – радиус сечения струи); χ – локальная относительная концентрация топлива; $\chi = c_f/c_a$ (c_f, c_a – концентрация соответственно топлива и воздуха, кг/м³). Ввиду малости доли объема струи, занимаемой топливом, принято, что концентрация воздуха равна его плотности: $c_a = \rho_a$.

Числовые значения этих коэффициентов зависят от вида функций

$$w/w_m = f_1(\xi) \text{ и } \chi/\chi_m = f_2(\xi),$$

т.е. от профилей скорости и концентрации в поперечном сечении струи. Если принять распределение скоростей в поперечном сечении струи по профилю Г. Шлихтинга [5], а распределение концентраций частиц топлива по профилю Г.Н. Абрамовича [6], то α_a =2,02, α_f = 1,43.

Описанные результаты позволяют представить движение струи дизельной форсунки как взаимодействие фаз струи, в результате чего происходит обмен количеством движения между частицами топлива и окружающим воздухом. При этом частицы теряют, а воздух приобретает количество движения. На некоторой части длины струи, примыкающей к ее фронту, доля количества движения, приходящаяся на частицы, становится относительно малой (рис. 6). Это является одним из оснований для вывода о том, что лишь для указанной части длины можно считать приемлемым рассмотрение многими авторами топливной струи как газовой.

Анализ распределения скоростей (рис. 7) показал, что на малых расстояниях от сопла имеет место заметный разрыв скоростей воздуха и частиц топлива, который по мере удаления от сопла быстро сокращается, и на некотором расстоянии указанные скорости становятся весьма близкими. Тем не менее, их значительная разность в данном случае имеет место примерно на половине длины струи. Отсюда может быть сделан важный вывод о том, что при математическом моделировании процессов движения рабочего тела и тепломассообмена в цилиндре дизеля, по крайней мере, применительно к начальному участку струи нет оснований для принятия широко распространенного допущения о равенстве скоростей осредненного движения жидкой и газовой фаз.

Приведенные выше, а также многие другие экспериментальные данные использованы для проверки и идентификации параметров комплексной математической модели рабочего процесса дизеля с объемным смесеобразованием. Модель реализована в программе CyberDiesel [4]. Пример результата работы программы представлен на рис. 7. Рисунок позволяет констатировать вполне удовлетворительное соответствие совокупности расчетных характеристик давления, температуры и скорости тепловыделения в дизеле соответствующим экспериментальным характеристикам.

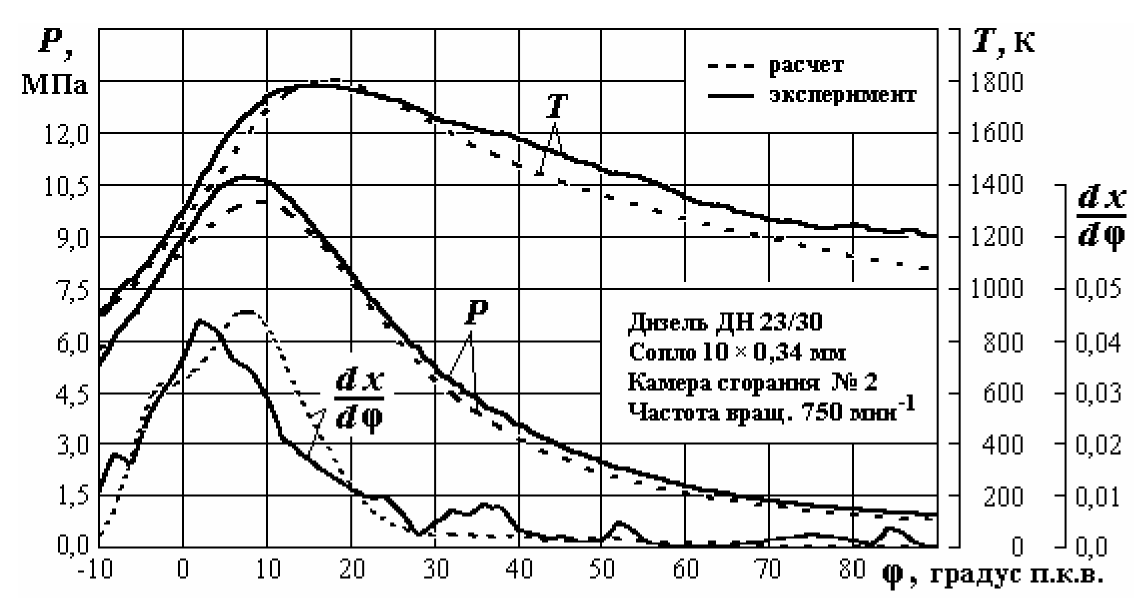


Рис. 7. Пример расчетных и экспериментальных характеристик давления, температуры и относительной скорости тепловыделения в дизеле

Выполнены расчеты и эксперименты при варьировании в широких диапазонах параметров топливной аппаратуры, камеры сгорания и режимов работы дизеля. Анализ показал, что математическая модель адекватно реагирует на изменения исследуемых факторов. Отклонение расчетных показателей дизеля (среднего индикаторного давления и удельного индикаторного расхода топлива) от экспериментальных находится в пределах 3,1 % на номинальном режиме дизеля и 8,3 % на режимах частичной нагрузки. Это свидетельствует о достаточно высоком качестве математического моделирования как каждого из элементарных внутрицилиндровых процессов, так и совокупности этих процессов.

Итак, проводимые экспериментальные исследования, фрагмент которых описан в настоящей статье, дают возможность уточнить представления о физической картине протекающих в дизеле процессов и получить необходимые количественные данные для создания адекватной их математической модели. В решении задачи обеспечения высокого качества смесеобразования и сгорания в дизеле могут быть использованы модели различных уровней сложности. Однако универсальных моделей, применимых без специальной настройки к разнообразным дизелям, не существует. Поэтому и при использовании известных моделей, и при разработке новой модели их параметры необходимо идентифицировать применительно к конкретному классу дизелей. Для выполнения идентификации параметров любой модели внутрицилиндровых процессов весьма ценным может оказаться описанный метод экспериментальных исследований и представленные результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свиридов Ю.Б., Кобзев А.И., Кукушкин В.Л., Романов С.А. Базовый эксперимент по природе дизельной струи // Двигателестроение. — 1992. — № 1—3. — С. 3—7.
2. Лебедев О.Н., Чирков С.Н. Теоретические основы процессов смесеобразования в дизелях. — Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 1999. — 370 с.
3. Гаврилов В.В. Методы и средства повышения качества смесеобразования и сгорания в дизеле // Двигателестроение. — 2003. — № 3. — С. 27—31.
4. Гаврилов В.В., Щукин П.А., Мащенко В.Ю. Совершенствование комплексной математической модели рабочего процесса дизеля с объемным смесеобразованием // Сб. материалов юбилейной науч.-техн. конф. 20 сентября 2000 г. — СПб.: ГМТУ, 2000. — С. 10—11.
5. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг, перев. с нем. — М.: Наука, 1974. — 711 с.
6. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. — М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1960. — 715 с.